

Beiträge der Wissenschaft zur Industrie 4.0!?

J. Wendelstorf

Institut für Metallurgie, Technische Universität Clausthal

`jens.wendelstorf@tu-clausthal.de`

Metallurgie-Kolloquium 2016

Institut für Metallurgie

TU-Clausthal

3. & 4. November 2016

doi:10.21268/20161102-111057

Der Begriff *Industrie 4.0* soll die deutsche Industrie dazu anregen, sich aktiv an der digitalen Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft zu beteiligen. Diese disruptive Veränderung unserer Lebenswelt wird im vorliegenden Beitrag in Bezug zur Wissenschaft gesetzt. Dazu wird die stufenweise Entwicklung von Industrie und Wissenschaft kurz dargestellt und es werden wichtige Merkmale und Gesetzmäßigkeiten erläutert.

Die Wissenschaft lieferte die Möglichkeiten für Technologien. Diese wiederum haben nun eine Komplexitätsebene erreicht, auf der Produktionsanlagen, Mitarbeiter und IT-Systeme auf der gleichen Stufe stehen. Es bildet sich ein sich selbst organisierendes Netzwerk heraus, welches die Entwicklung von Gesellschaft und Biosphäre prägen wird. Ein wesentlicher Aspekt ist die Abwesenheit eines Systemarchitekten oder einer zentralen Planung. Industrie 4.0 ist somit mehr als nur *neues Bla-Bla zur Steuergeldaquise* oder die *Eier legende Wollmilchsau zur Sicherung unseres Wohlstands*. Damit sich keine *Desintegration des Gemeinwesens*, sondern eine *Weiterentwicklung der Gesellschaft* ergibt, muss die digitale Transformation gestaltet werden. Diese Gestaltung geschieht über die Regeln, nach denen die Teilsysteme interagieren.

Jeder Wissenschaftler sollte versuchen, sein persönliches Arbeitsgebiet in die sich herausbildenden Strukturen einzuordnen und den Wandel mit zu organisieren. Dies wird am Beispiel der Prozessmodellierung kurz skizziert.

1 Einleitung



Abb. 1: Der *risk iceberg* (NASA, Photo: Rick Du Boisson).

Nach dem 2. Weltkrieg war vielen Wissenschaftlern klar, welches disruptive Veränderungspotential Wissenschaft und Technik für die Lebenswelt der Menschen bereithalten [1]. Die essentielle Bedeutung von Bildung (für Jung und Alt) für die Weiterentwicklung der Gesellschaft wurde herausgestellt, dann jedoch von der Dominanz der Machterhaltungssysteme in Ost und West in den Hintergrund gedrängt. Während die Industrialisierung auf der Basis der sich schnell entwickelnden – nicht nachhaltigen – Technologien fortschritt, erklomm die Wissenschaft immer neue Ebenen der Komplexität. Die qualitativen Veränderungen machten sich zunächst nicht allgemein bemerkbar, da diese von quantitativen Veränderungen (Wachstum) überdeckt wurden. Was vorher außerhalb der Wissenschaft nur durch Bücher von Futurologen in das Bewusstsein der Öffentlichkeit dringen konnte (z.B. [2]), wurde schließlich um die Jahrtausendwende zunehmend wahrgenommen: Die digitale Transformation schreitet unaufhaltsam voran und verändert alle Bereiche der Zivilisation qualitativ.

Es wurden zunächst auch durch Begriffe wie *new economy* oder *eTransformation* verwendet [3], vor einigen Jahren wurde **Industrie 4.0** als Oberbegriff eingeführt [4, 5]. Was vielen als weiteres Schlagwort für den Reputationsmarkt („wir sind zukunftsfähig“) erscheint, hat jedoch einen harten Kern. Wie durch den *Risk Iceberg* der NASA (Abb. 1) visualisiert wird, handelt es sich nicht um ein neues Produkt oder eine neue Technologie, sondern um ein bis auf weiteres von den *unknown unknowns* bestimmtes Phänomen.

Dieses Phänomen ist ohne Zweifel hoch komplex. Daher ist es zunächst sinnvoll, sich über unsere individuelle Wahrnehmung komplexer Phänomene Gedanken zu machen. Komplexität ist nicht von ungefähr ein Schlüsselbegriff in der Informatik, die schnell lernen musste, dass die Quantifizierbarkeit von Komplexität in viele unabhängige Richtungen (Dimensionen) erfolgen kann. Wie in Abb. 2 dargestellt ist, können wir für jede dieser Dimensionen, auf die wir ein komplexes Phänomen reduzieren (Komplexitätsmaß), versuchen, unsere individuelle Wahrnehmung mit der (vermuteten) Realität zu vergleichen. Es ergibt sich ein durch eine **Aufmerksamkeitsschwelle** und eine **Verarbeitungsgrenze** bestimmtes **persönliches Wahrnehmungsfenster**. Dieses Wahrnehmungsfenster ist individuell und kann nur durch ähnliche

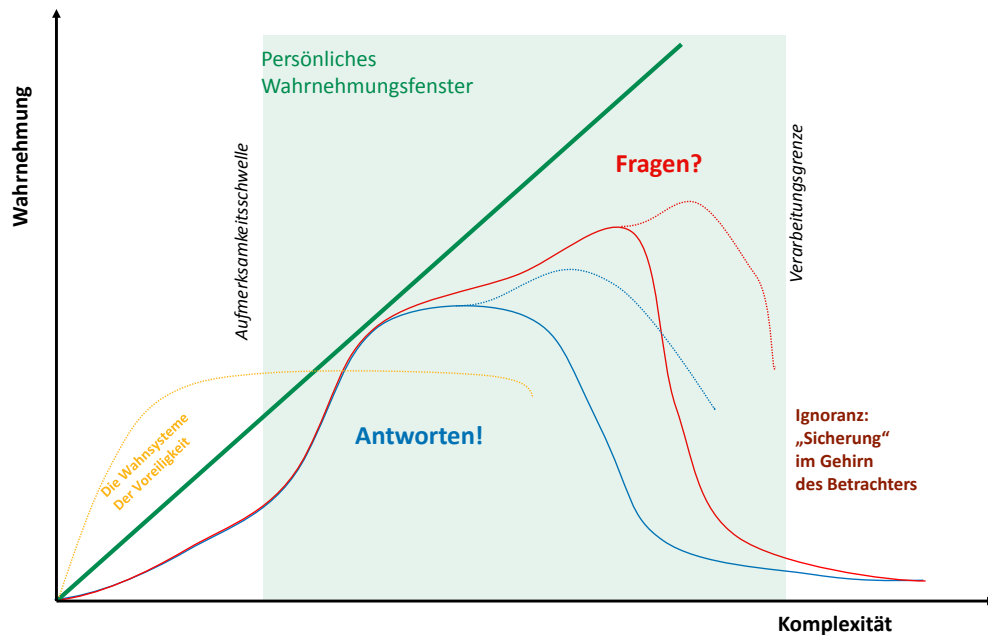


Abb. 2: Die individuelle Wahrnehmung von Komplexität.

persönliche Voraussetzungen (Kultur, Bildung und Begabung) zur Überlappung gebracht werden. Unser Gehirn ist vor nicht verarbeitbarer Komplexität durch Ignoranz geschützt¹. Es ist Aufgabe der Wissenschaft, diese Ignoranz jeweils wahrnehmbar abzubilden: Wahres Wissen bedeutet den Umfang der eigenen Ignoranz zu kennen [Konfuzius].

Bei der Beschäftigung mit dem Thema **digitale Transformation** oder **Industrie 4.0** stößt man zunächst auf eine Vielzahl von Fachbegriffen (Abb. 3), die teilweise einer Erklärung oder Kommentierung bedürfen:

- Das Internet der Dinge (**Internet of Things**) bezeichnet ein Netzwerk von Geräten, die über das Internet kommunizieren. Der Unterschied zum bisherigen Internet liegt in der fehlenden Beteiligung von menschlichen Bedienern. Der Begriff soll verdeutlichen, was mittlerweile Alltagserfahrung ist. Technische Geräte verfügen über eine WWW-Schnittstelle, z.B. die in fast jedem Haushalt vorhandenen WLAN-Router. Natürlich kommunizieren diese Geräte dabei nicht nur mit menschlichen Anwendern, sondern in viel größerem Umfang untereinander, z.B. übertragen die WLAN-Router ständig Daten an die jeweiligen **Internet Service Provider**.
- Das **Cyber Physical System** bezeichnet den Verbund informationstechnischer Systeme mit mechatronischen Teilen, die über eine Dateninfrastruktur kommunizieren.
- Die **Information and Communication Technology** bildet die Basis der hier zu analysierenden Entwicklungen.
- Die **Cloud** ist eine Verlagerung der Daten- und Rechnerinfrastruktur von den Benutzern (Besitzer, Produzenten) hin zu über das Internet erreichbaren Systemen, deren physikalische Realisierung und Kontrolle unwichtig erscheinen soll.
- Mit **Cryptocurrency** werden Zahlungsmittel charakterisiert, die auf der Basis von Block-Chain-Algorithmen auf die Existenz zentraler Vertrauensinstanzen verzichten, beispielsweise Bitcoin.

¹Ignoranz kann durchaus als generelle Eigenschaft neuronaler Netzwerke betrachtet werden.

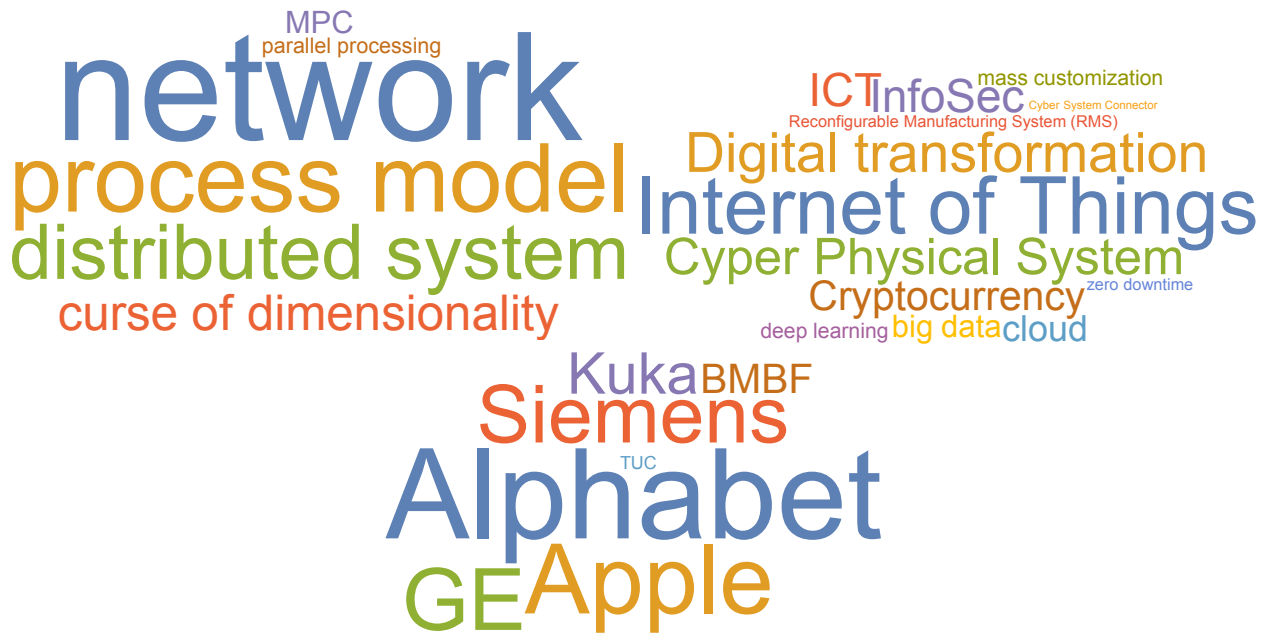


Abb. 3: Die Begriffe der Industrie 4.0 als WordCloud.

- ...
- Das Netzwerk (**network**) stellt sicherlich den Schlüsselbegriff dar. Es sollte klar sein, das darunter alle Mischformen zwischen zentralistisch und dezentral fallen – mit durchaus sehr unterschiedlichen Eigenschaften.
- ...
- *Alphabet (Google)* ist sicherlich der mächtigste Akteur der digitalen Transformation (im Bereich der demokratischen Staaten).
- *Apple* demonstriert seit Jahrzehnten die Bedeutung des Zipf'schen Gesetzes.
- ...

Im Folgenden werden nun die Fundamente dieser Entwicklung aus wissenschaftlicher Sicht kurz beschrieben. Dazu werden die Wissenschaft selbst und die Industrie in den beiden folgenden Abschnitten einer kurzen Analyse unterzogen, deren Grundlagen und Grenzen dann zusammengefasst werden. Das abschließende Beispiel stellt den konkreten Bezug zu Arbeitsgebiet des Autors her und versucht so einen weiteren Blickwinkel zu erschließen.

2 Die Entwicklungsebenen der Wissenschaft

Bevor exemplarisch versucht werden kann, die Grundlagen und die Entwicklungsgeschichte von Industrie und Wissenschaft in Beziehung zu setzen, muss zunächst versucht werden, die wesentlichen Aspekte beider Sphären herauszuarbeiten. Die Wissenschaft ist ein intellektuelles Projekt, dessen Eingrenzung beispielsweise über Grundprinzipien und Entwicklungsebenen geschehen kann.

2.1 Prinzipien und Anforderungen der Wissenschaft

Die Naturwissenschaft ist die Suche nach dem kürzesten korrekten Modell der Welt, die kritische Suche nach der Wahrheit – Wissenschaftler sind somit eine Art freie Journalisten ohne Publikum. Einige Prinzipien haben sich als unabdingbar erwiesen:

2.1.1 Ockham's Rasiermesser

Ob es nun von Aristoteles bereits angewendet wurde oder nicht, das Prinzip der maximalen Vereinfachung sollte jeder Wissenschaftler verinnerlicht haben. Es wurde von Wilhelm von Ockham oft angewendet und ähnliche Aussagen werden vielen berühmten Wissenschaftlern zugeschrieben. Es als **Keep It Simple Stupid**-Prinzip zu bezeichnen ist eingängig, unterschlägt jedoch die Warnung vor zu starker Vereinfachung (Einstein wird er Satz zugeschrieben „everything must be made as simple as possible, but not one bit simpler“).

Dieses Prinzip entspricht dem Anspruch der Wissenschaft, nicht nur Fakten (Wahrheit) zu sammeln, sondern auch nach möglichst genauen und einfachen Beschreibungen zu suchen. Dabei wird oft der Satz „*das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile*“ verwendet, wobei es sich bei dem *mehr* (an Eigenschaften) idealerweise um ein *weniger* (an Beschreibungsaufwand) handelt. Wesentliche Aspekte eines Systems können mit einer einfacheren Beschreibung erfasst werden, die *mehr* ist als die Summe der Beschreibungen der Systemkomponenten.

2.1.2 Messen, was messbar ist, und messbar machen, was noch nicht meßbar ist

Auch wenn dieser Satz so von Galileo Galilei nicht ausgesprochen wurde, so ist es doch die Quintessenz seiner Arbeit und wurde sicherlich auch von Eratosthenes von Kyrene angewendet.

Die wissenschaftliche Hauptaufgabe der Messung spielt gerade im Bezug auf die Digitalisierung eine wesentliche Rolle, da immer kostengünstigere Sensoren immer zahlreicher eingesetzt werden. Dabei ist es Aufgabe der Wissenschaft, diese Sensordaten als Messwerte zu qualifizieren. Nur allzu oft werden Werte mit vielen Nachkommastellen und hohen Abstrakten generiert, die bei kritischer Überprüfung wenig Wahrheit enthalten.

Da es bei der Digitalisierung auch um die Gestaltung von Netzwerken geht, sollten die zugehörigen wissenschaftlichen Grundlagen im Auge behalten werden, auch wenn diese bereits vor Jahrzehnten gelegt wurden (siehe Abschnitt 4). Hinzu kommt eine neue Art von Messungen: Die Computerexperimente. Diese können ebenfalls mit systematischen und statistischen Fehlern behaftet sein. Aus **Design Of Experiments** [6] wird *Design and analysis of simulation experiments* [7].

Von entscheidender Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Falsifikation. Ohne in prinzipielle Diskussionen zu verfallen [8]: Jede Messung sollte eine (möglichst kleine) Menge von Werten liefern, in der der wahre Wert enthalten sein muß, jedes Modell (oder jede Theorie) sollte durch derartige Messungen widerlegbar sein. Und jede Messung muss – zu allen Zeiten von jedermann mit der entsprechenden Ausstattung – reproduziert werden können. Diese Reproduzierbarkeit impliziert natürlich die Pflicht zur entsprechenden Publikation von Messungen.

2.1.3 More is different: Die Hierarchie der Wissenschaften

Ein Paradigma der Wissenschaft, die reduktionistische Hypothese, bezieht sich auf die Möglichkeit, alles auf einfache Grundgesetze zurückzuführen. Es ist hingegen ein weit verbreite-

ter Irrtum, ausgehend von diesen Grundgesetzen eine Konstruierbarkeit des Universums zu postulieren. Diese konstruktivistische Hypothese scheitert an der Zwillingsproblematik von Skalen und Komplexität [9]. Auf jeder Ebene der Komplexität ergeben sich neue Eigenschaften, deren Erforschung nicht weniger fundamental ist als die Suche nach den grundlegendsten Naturgesetzen – jedoch oft von erheblich größerer praktischer Bedeutung. Was in der Physik mit dem Terminus Symmetriebrechung verknüpft ist, wird in der Komplexitätstheorie mit den Begriffen Selbstorganisation und Emergenz kategorisiert. So wie jede Wissenschaft X elementare Objekte enthält, die den Gesetzen der Wissenschaft Y folgen, so werden auch Digitalisierungsprojekte hierarchisch in Teilaufgaben zerlegt. Mit klaren Schnittstellen, einheitlicher Nomenklatur und möglichst eindeutigen Aussagen – *tertium non datur*. Ockham's Rasiermesser rechtfertigt weniger eine theoretische Gesamtmethodik als eine für den jeweiligen Einzelfall optimale Vorgehensweise.

Die in der Informatik übliche hierarchische Struktur findet sich in der Wissenschaft ganz allgemein. Es wird mit Beschreibungsebenen gearbeitet. Diese decken sich teilweise mit den räumlichen oder zeitlichen Skalen der betrachteten Prozesse.

2.1.4 Peer-Review und der Menschentypus Wissenschaftler

Noch wird Wissenschaft im wesentlichen von Menschen betrieben. Diese leben und arbeiten in einem sozialen Umfeld, welches die Anwendung der wissenschaftlichen Prinzipien zumindest zulassen, optimalerweise auch unterstützen sollte.

Die Wahrheit kann nicht diktiert oder von einer Mehrheit bestimmt werden. In der digitalisierten Wissenschaft wird in jedem Fachgebiet mehr publiziert als der Einzelne jemals lesen kann. Durch das *Peer-Review* wird weiterhin versucht, die Spreu vom Weizen zu trennen. Somit entscheiden idealerweise die besten Fachkollegen darüber, was in den jeweils besten Zeitschriften publiziert wird. Das Publizieren selbst ist hingegen im Zeitalter des Internet nicht mehr eingeschränkt, ebenso wie die Archivierbarkeit aller Daten.

Abschließend bleibt zu klären, welches Umfeld und welche persönlichen Eigenschaften – neben den so wichtigen Zufällen des *zur richtigen Zeit am richtigen Ort* – wissenschaftliches Arbeiten befördern:

- Verständnis und Akzeptanz für die vorgenannten Prinzipien.
- *Unabhängigkeit* und (wirtschaftliches) *Desinteresse*.
- *Kritikfähigkeit*.
- Bereitschaft und Befähigung zur *objektiven Darstellung* (Publikation).

In der Wissenschaft gibt es bisher keine objektiven und zielführenden sozialen Selektionsmechanismen, da diese in der Regel nach Bekanntwerden umgangen werden. So ist beispielsweise der h -Index [10] nur für diejenigen Wissenschaftler messbar, deren Publikationen vor dem Aufkommen derartiger Messungen erschienen sind. Jeder Wissenschaftler ist letztendlich selbst verantwortlich für einen Kompromiss zwischen wissenschaftlicher Produktivität und angemessener Erhaltung und Verbesserung der eigenen Arbeitsbedingungen.

2.2 Die Geschichte der Wissenschaft in Versionen

Bevor wir uns der These einer *Industrie 4.0* widmen, wird in diesem Abschnitt versucht, auch die Entwicklungsgeschichte der Wissenschaft mit Versionsnummern zu versehen.

Wissenschaft 1.0: Die Messung \Rightarrow Formel

Mit Galilei und Newton konnte sich die erste (und wichtigste) Version der Wissenschaft etablieren: Eine mathematisch formulierte These wird mit Messungen überprüft oder Messungen führen auf (verbesserte) Theorien. Die entscheidende Rolle spielt dabei deren mathematische Formulierung. Die Mathematik etablierte sich als Sprache der Naturwissenschaft. Aristoteles hat bei seiner Aussage „die genaue Schärfe der Mathematik aber darf man nicht für alle Gegenstände fordern, sondern nur für die Stofflosen. Darum passt diese Weise nicht für die Wissenschaft der Natur, denn alle Natur ist wohl mit Stoff verbunden“² einfach übersehen, dass die Mathematik auch zur Beschreibung unscharfer Phänomene taugt.

Die Liste der Nobelpreisträger für Physik zeigt, wie oft erst theoretische Vorhersagen Messungen stimulierten und ermöglichten; eine Vorgehensweise, die in den Ingenieurwissenschaften erst mit der Digitalisierung unverzichtbar werden wird.

Als Kerngebiet der Wissenschaft 1.0 kann die Mechanik gelten, als Protagonisten bekannte Namen von Galileo bis Einstein.

Wissenschaft 2.0: Desorganisierte Komplexität \Rightarrow Theorie

Nachdem die reduktionistische Suche nach den Grundbausteinen der Materie so erfolgreich war, stellte sich natürlich die Frage nach den Beziehungen zwischen den verschiedenen Beschreibungsebenen. Die ersten konkreten Ergebnisse auf den Gebieten der Statistik und Thermodynamik verdanken wir Ludwig Boltzmann und Josiah Willard Gibbs [11, 12]. Für jeden leicht verständlich ist die Tatsache, dass ein mit einem Gas gefülltes Volumen durch seine thermodynamischen Zustandsgrößen ausreichend charakterisiert ist und selbst die nicht mögliche Bestimmung der Trajektorien aller einzelnen Atome in diesem Volumen im thermodynamischen Gleichgewicht keine zusätzlichen nutzbaren Erkenntnisse liefern würde.

Wissenschaft 3.0: Organisierte Komplexität \Rightarrow Modell

Zwischen der genauen Beschreibung homogener Einzelteilchen (oder analoger Phänomene) und der statistischen Beschreibung einer sehr großen Zahl gleichartiger Entitäten bleibt viel Raum. Und das ist gerade der Raum, in dem sich die Phänomene der Biosphäre (Leben) abspielen.

Mit der wissenschaftlichen Untersuchung dieser Phänomene der organisierten Komplexität, für die hier exemplarisch nur die Arbeit von Hans Adolf Krebs genannt werden soll [13], konnten Gebiete wie die Biologie und die Soziologie den Weg aus dem Ghetto der reinen Sammlung und Klassifikation von Messungen und historischen Daten finden.

Wissenschaft 4.0: Computational Science \Rightarrow Netzwerk

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Wissenschaft in drei aufeinander aufbauenden Ebenen eingeteilt. Dabei sollte nicht verschwiegen werden, dass weiterhin auf allen dieser Ebenen viele weiße oder graue Flecken geblieben sind. Zudem stimulieren und erfordern die Fortschritte auf einer Ebene in der Regel Verbesserung auf anderen Ebenen.

Zur Zeit erleben wir eine weitere Innovationswelle, die von der zunehmend verfügbaren kritischen Masse an Rechnerleistung getragen wird. Gottfried Wilhelm Leibniz bemühte sich noch weitgehend erfolglos, die winzigen Fähigkeiten des Menschen im numerischen Rechnen

²Metaphysik 995a 14-17

maschinell zu verbessern. Heute steht jedem Schulkind die Rechenleistung der Supercomputer von vor 20 Jahren zur Verfügung. Nach einer letzten Phase der Steigerung der *seriellen Rechenleistung* nach dem Moore'schen Gesetz in den 1990er Jahren steigert sich weiterhin die bei konstanten Kosten verfügbare *parallele Rechenleistung* und auch die heute oft wichtigere *Bandbreite der Datenübertragung*. Basierend auf vielen lange verfügbaren Grundlagen auf dem Gebiet der wissenschaftlichen Informatik hat sich eine Wissenschaft herausgebildet, die im wesentlichen auf Softwarewerkzeugen und Computerexperimenten basiert. Dabei sind Werkzeuge mit einer vor wenigen Dekaden noch unvorstellbaren rechnerischen Produktivität entstanden, beispielsweise durch die Arbeit von Stephen Wolfram [14, 15].

Die den Wissenschaftlern nun zur Verfügung stehenden rechnerischen Hilfsmittel, zusammen mit einer automatisierten Vermessung der Welt, ermöglichen nun auch eine auf Prozessmodellen und deren Netzwerken basierende wissenschaftliche Beschreibung und Vorhersage.

Nun sollte ein grober Eindruck von den Grundprinzipien der Wissenschaft entstanden sein, für die Details sei auf die Literatur verwiesen [16, 17, 18], wobei auch eine kritische Analyse des Wissenschaftsbetriebes lehrreich sein kann [19].

3 Die Entwicklungsebenen der Industrie

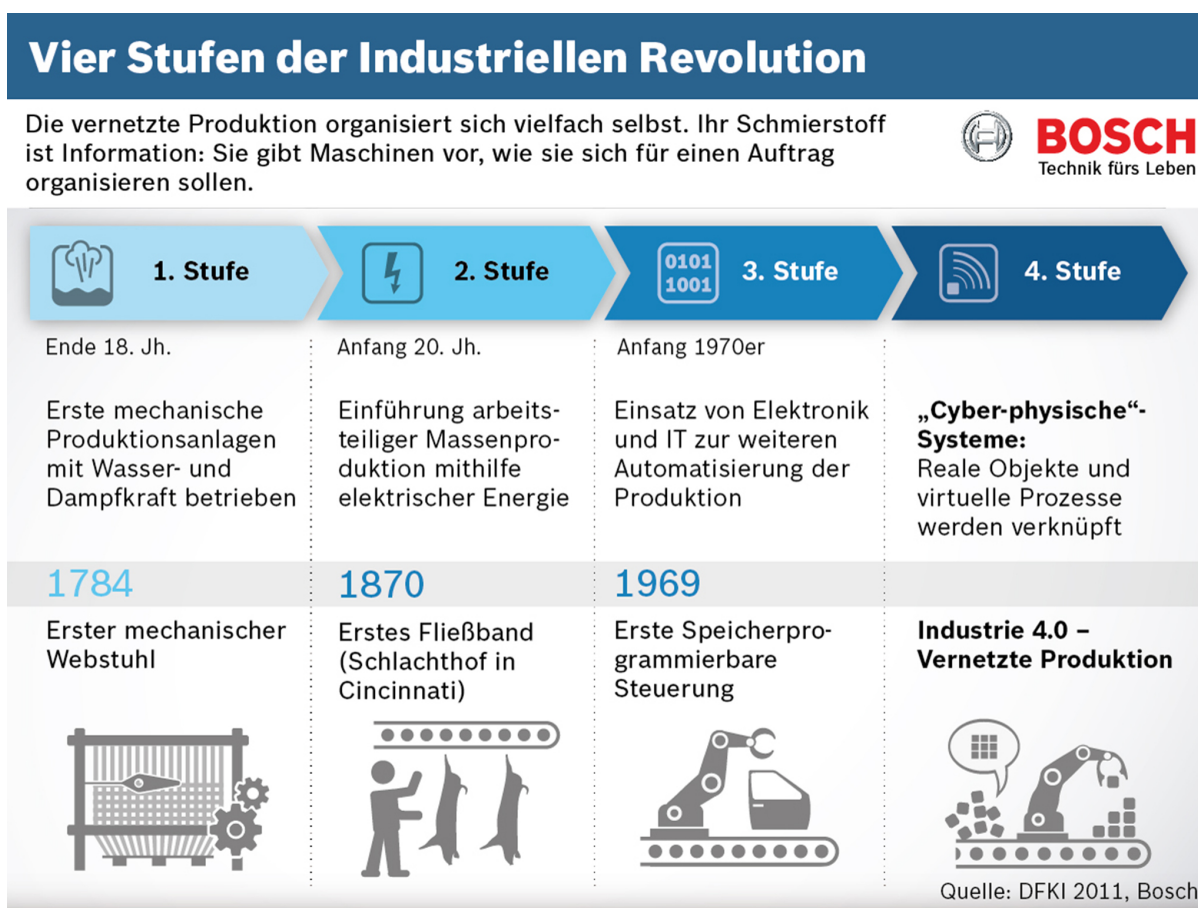


Abb. 4: Die Stufen der industriellen Entwicklung (Bosch, 2016).

Industrie 1.0 bis 3.0: Industrialisierung schrittweise?

In *Abb. 4* werden die Stufen der industriellen Entwicklung dargestellt. Die vergangenen Entwicklungsstufen sind weitgehend akzeptiert, bei der Neuesten (4.0) ist jedoch hervorzuheben, dass die Vernetzung einzelner adaptiver Systeme den wesentlichen Unterschied zur vorhergehenden Stufe darstellt; die modellbasierten Regler gibt es ja nun schon fast 40 Jahre [20]. Zudem verlief die industrielle Entwicklung lokal zwar durchaus in Einzelschritten, die global betrachtet jedoch einen weitgehend kontinuierlichen Verlauf ergeben.

Die ersten drei Entwicklungsstufen der Industrie stellen eine Untergliederung der zugrunde liegenden Industrialisierung der Gesellschaft dar. Dieser Übergang von der Agrar- zur Industriegesellschaft begann mit der Verfügbarkeit maschineller mechanischer Energie durch die Dampfmaschine und war anfänglich von einer Massenproduktion unter massivem Einsatz von menschlichen Arbeitskräften geprägt (*Abb. 5*). Mit der Verfügbarkeit elektrischer Energie und entsprechender Antriebe und der durch die Informationstechnologie weiter intensivierten Automatisierung ist eine hoch automatisierte und hoch produktive Industrie entstanden, die Teile der Menschheit mit allen materiellen Gütern versorgt und erste Anstrengungen in Richtung Nachhaltigkeit unternimmt. Der direkte Vergleich von *Abb. 5* mit *Abb. 6* zeigt jedoch, worum es vor allem geht: Die wirtschaftliche Rationalisierung durch die Minimierung des teuren Einsatzes menschlicher Arbeitskräfte.

Die industrielle Automatisierung organisiert sich zur Zeit in Form einer Pyramide (*Abb. 7*), womit zumindest der Anschein einer zentralen Kontrolle durch das Management aufrecht erhalten wird.

Industrie 4.0: Die dritte Welle?

Die digitale Vernetzung der Weltgesellschaft besteht technisch betrachtet aus einem Netzwerk miteinander kommunizierender Computer. Ob es sich dabei um PC's, mobile Endgeräte, Haushaltsgeräte oder andere Bestandteile unserer technisierten Umwelt handelt, ist nicht relevant, da ja kompatible Technologie verwendet wird (TCP/IP). Zudem werden Produkte und Prozesse nicht mehr manuell am Zeichentisch, sondern mit Hilfe von Spezialsoftware entwickelt und realisiert. Der Begriff der **Cyber-Physischen-Systeme** fasst nun dieses Zusammenwachsen der einzelnen technischen Disziplinen unter der Ägide der Steuerungssysteme zusammen. Die Architektur zur Implementierung von Industrie 4.0 kann wieder als Pyramide dargestellt werden (*Abb. 8*). Diese in [21] behandelte Architektur der Cyber-physischen Systeme erfordert nur noch auf den oberen Ebenen Eingriffe durch die Mitarbeiter der Unternehmen.



Abb. 5: Eisenwalzwerk in 19. Jahrhundert (Gemälde von Adolph Menzel, 1875).



Abb. 6: Industrie 2014: Walzwerk (Danieli).

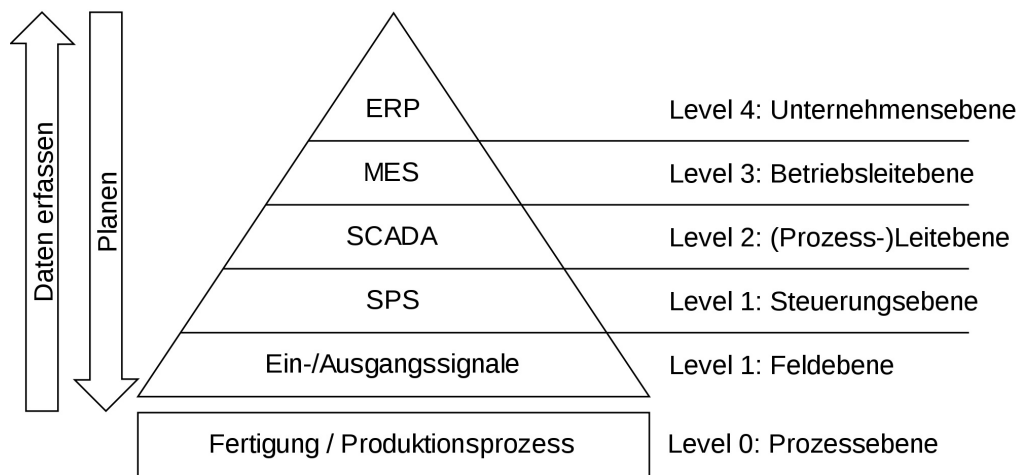


Abb. 7: Automatisierungspyramide [Wikipedia].

In der aktuellen Diskussion werden unter den Oberbegriffen Industrie 4.0 oder Maschinenbau 4.0 vor allem einige aktuelle Innovationen verstanden:

- Die Entwicklung intelligenter Anlagenbausteine (*plug and play*) mit neuen Fähigkeiten zur Inbetriebnahme, Überwachung, Wartung und Selbstorganisation (*self ...*).
- Die Sicherstellung einer robusten Verfügbarkeit bei immer komplexeren Anlagen ³.
- Die Individualisierung von Massenprodukten, am einfachsten mit den immateriellen Systemkomponenten zu realisieren.
- Die Einführung von virtuellen Ebenen (*cyber level*) als zentralen Schauplatz der Informationsverarbeitung, auf dem die virtuellen Prozesse und Anlagen (*cyber twin*) zur Vorhersage und automatisierten Optimierung des Anlageneinsatzes und der Anlagenvernetzung verwendet werden.
- ...
- Eine höhere Automatisierung von Bürotätigkeiten, das Aufgabenspektrum des Einkaufs verengt sich beispielsweise auf strategische Ansätze.

Es bleibt jedoch zu überlegen, ob es sich bei den Unterschieden zwischen Industrie 3.0 und 4.0 um Ursachen oder Auswirkungen einer neuen Entwicklungswelle der Weltgesellschaft handelt. Da die menschliche Arbeitskraft in absehbarer Zukunft auf keinem Gebiet mehr über Alleinstellungsmerkmale verfügt, werden disruptive gesellschaftliche Konsequenzen nicht zu verhindern sein. Die psychologischen Auswirkungen dieser Innovationswelle auf die Weltgesellschaft haben das Potential, alle durch technische Fragen oder physikalische Grenzen bestimmten Probleme in den Hintergrund der Wahrnehmung zu drängen.

Wesentlich für die Beurteilung und Gestaltung der aktuellen Entwicklungen sind jedoch weniger die Ontologien als die durch unabänderliche Naturgesetze vorgegebenen Grundlagen und Grenzen als Basis für Entscheidungen über die Rahmenbedingungen zur Nutzung der digitalen Technologien. Diese sollen im nächsten Abschnitt angerissen werden.

³Wissenschaftler würden zunächst auf eine Vereinfachung bei gleicher Funktionalität hinarbeiten, die IT Industrie lebt von der Machterhaltung durch Komplexitätssteigerung.

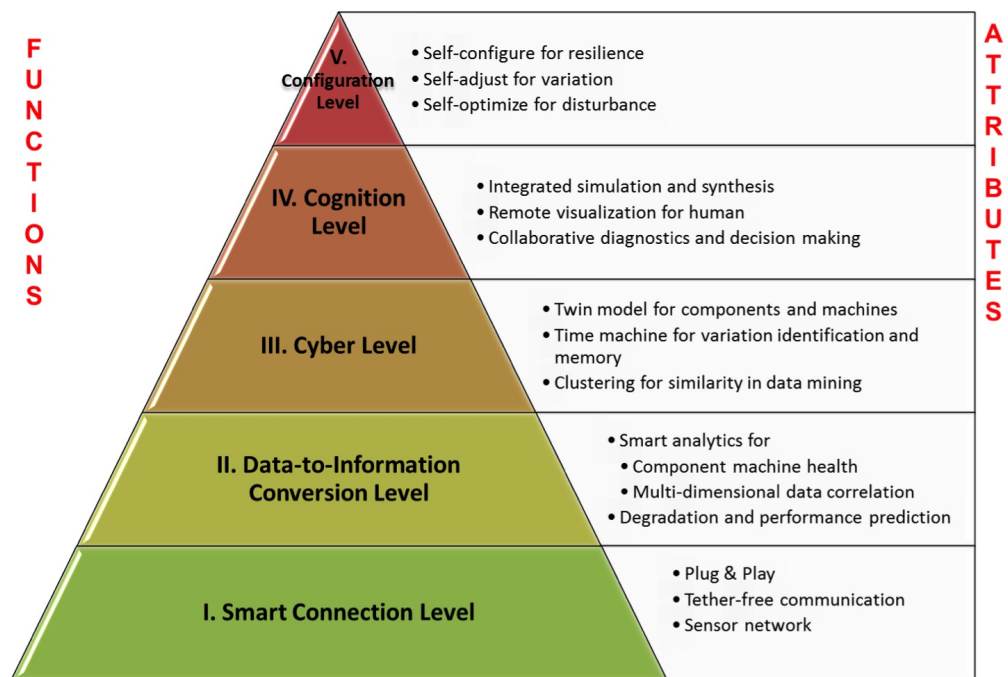


Abb. 8: 5C Architektur zur Implementierung Cyber-Physischer-Systeme [21].

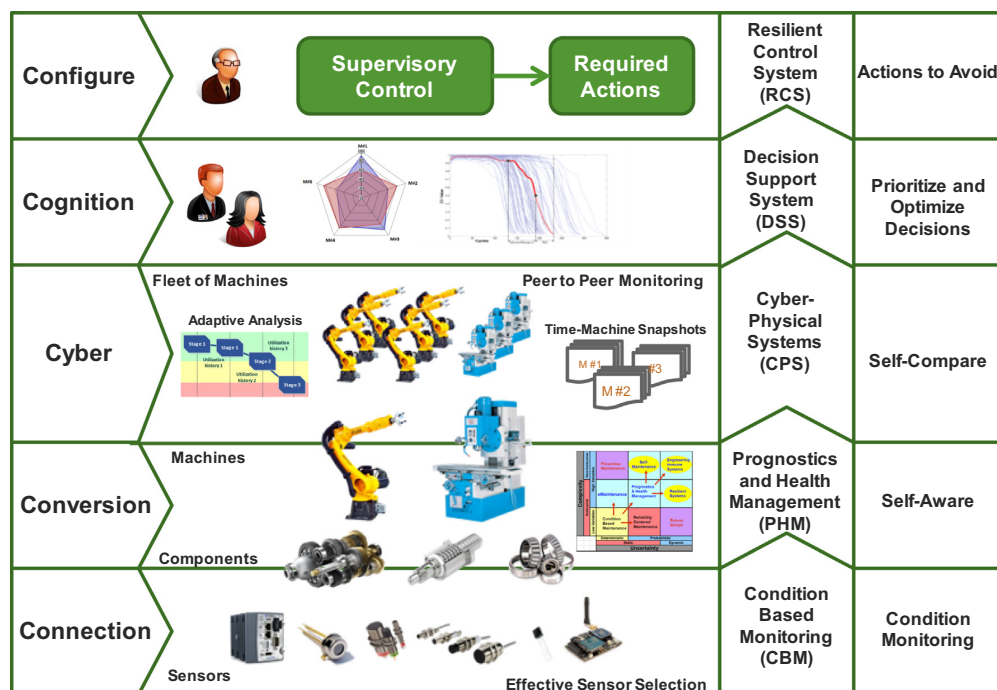
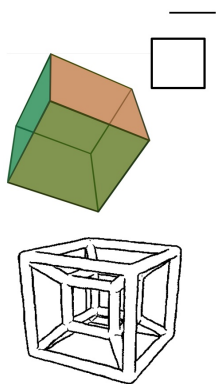


Abb. 9: Anwendungen und Techniken der einzelnen Ebenen der 5C Architektur [21].

4 Grundlagen und Grenzen



„nur die
Ecken“

„1 Pkt. i.d.
Mitte“

„10%
Abstand“

n_{Dim}	2^n	3^n	9^n	Speicherplatz	Rechenzeit
1	2	3	9	36 B	9 Sekunden
2	4	9	81	324 B	81 Sekunden
3	8	27	729	2,8 kB	12 Minuten
4	16	81	6561	25,6 kB	109 Minuten
5	32	243	59049	230 kB	16 Stunden
6	64	729	531441	2 MB	6 Tage
7	128	2187	4782969	18,2 MB	8 Wochen
8	256	6561	43046721	164 MB	71 Wochen
9	512	19683	387420489	1,4 GB	12 Jahre
10	1024	59049	3486784401	13 GB	111 Jahre

Abb. 10: Verarbeitungsaufwand in n-dimensionalen Parameterräumen.

Der Fluch der Dimensionalität

Die *curse of dimensionality* beschreibt die Auswirkungen hochdimensionaler Räume, die von uns durch die Vertrautheit mit 1 bis 3 Dimensionen oft unterschätzt werden [22]. Wie bereits diskutiert ist es Aufgabe der Wissenschaft, zu jedem Problem nicht nur eine eindeutige Formulierung (Frage), sondern auch möglichst niedrig dimensionale (einfache) Modelle (Antworten) zu liefern. Wie in Abb. 10 dargestellt wirkt sich die Anzahl der unabhängigen Einflußfaktoren (Dimensionen) stark auf den zu betreibenden Aufwand aus. Je nachdem ob in einem hochdimensionalen Parameterraum nur die Ecken, die Ecken und ein Punkt in der Mitte oder 10 Proben in jeder Richtung untersucht werden sollen, verdoppelt, verdreifacht oder verzehnfacht sich der Aufwand mit jeder zusätzlichen Dimension.

Damit bleiben auch die Lernmöglichkeiten der leistungsfähigsten Computer begrenzt [23]. Es kann angenommen werden, dass das menschliche Gehirn auf dem Gebiet der *differenzierten Betrachtung komplexer Phänomene* noch einige Zeit nicht von künstlichen Intelligenzen übertroffen werden wird, zumal wir Arbeitsumfelder schaffen können, in denen die intellektuelle Leistung einer Gruppe über der eines Einzelnen liegen kann. Um derartige Aussagen fundiert zu tätigen, wurde in Abb. 11 versucht, die beiden leistungsfähigsten uns bekannten Informationsverarbeiter gegenüber zu stellen.

Selbst preiswerte Rechenkerne haben die GigaFLOP⁴-Grenze überschritten und in China arbeiten Supercomputer mit 10 Millionen Kernen an der ExaFLOP-Grenze. Dies alles ist nur möglich, weil – wie Richard Feynman schon 1959 feststellte – *unten eine Menge Platz ist*, d.h. es stehen zwischen den für Menschen direkt erfahrbaren Skalen und den atomaren Grenzen eine Menge Größenordnungen für technologische Anwendungen zur Verfügung.

Das Gehirn kann Informationsflüsse extrem stark reduzieren (*erkennen* und *bewerten*) und weist mit unserem Bewusstsein eine emergente Eigenschaft auf, die wir bei IT-Systemen noch

⁴1 GFLOP=10⁹ Gleitkomma-Rechenoperationen pro Sekunde

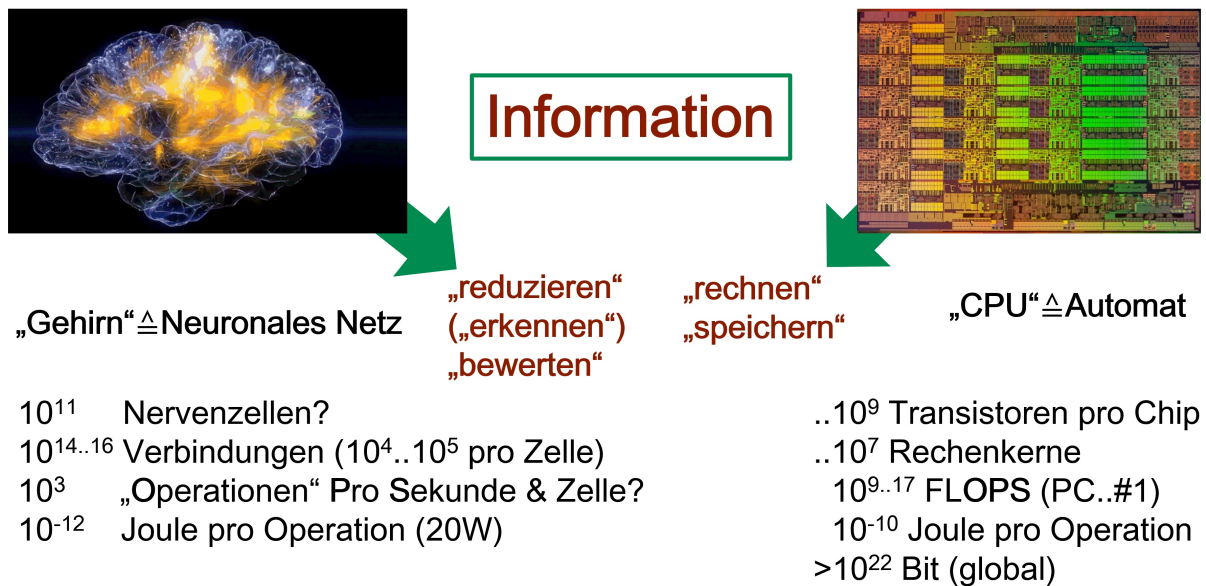


Abb. 11: Informationsverarbeitung mit Gehirn und Computer.

nicht beobachten (können?). Unsere auf der Basis der Halbleitertechnologie auf fast schon atomaren Skalen arbeitenden Computer waren von Anfang an in der Lage, numerische Rechenoperationen wesentlich schneller durchzuführen als wir das je konnten. Sie eignen sich perfekt zum Rechnen und zum Speichern von Informationen. Die jahrzehntelange Entwicklung nach dem Moore'schen [24] und dem Gilder'schen Gesetz hat zu Rechnersystemen geführt, die als Einzelanlage in ihrer quantitativen Leistungsfähigkeit mit dem menschlichen Gehirn in derselben Komplexitätsklasse anzusiedeln sind. Durch CPU-Kosten im Bereich weniger Dollar und geringe Kosten der Kommunikationsbandbreite hat sich zudem die Anzahl der Rechner und die in diesen gespeicherte Informationsmenge in Größenordnungen bewegt, die mit biologischen Systemen vergleichbar sind. Da eine Informationsverarbeitung prinzipiell mit vernachlässigbarem Energieeinsatz (Entropierzeugung) denkbar ist und die physikalischen Grenzen der aktuellen Technologien im Bereich atomarer Einheiten liegen (100 eV/FLOP?), ist eine weitere Steigerung der Energieeffizienz der Computer zu erwarten.

Physikalische Grenzen

In der physischen Welt gibt es für den minimal notwendigen Energieeinsatz und die bei vorgegebenen Anlagenkosten mögliche Produktivität durch die Naturgesetze vorgegebene Grenzwerte. So konnte beispielsweise die Energieeffizienz der Stahlherstellung von über 50 GJ/t nach dem 2. Weltkrieg auf unter 20 GJ/t im Jahre 1980 gesteigert werden. Seitdem arbeitet sich die Industrie an einer scheinbaren Grenze von 10 GJ/t ab [25]. Die theoretische Grenze liegt bei 3 GJ/t für die Erzeugung flüssigen Eisens aus reinem Erz [26].

Bei der Produktion von materiellen Gütern ist grundsätzlich von harten Grenzen in Bezug auf den Energieeinsatz pro Masseneinheit auszugehen. Hinzu kommt der *entropische Anteil*, der einer Recyclingwirtschaft insofern Grenzen setzt, als das der Aufwand mit zunehmender Vermischung der Edukte und zunehmenden Forderungen an den Reinheitsgrad der Produkte stark ansteigt.

Die Berechnung der physikalischen Grenzen erfordert eine Festlegung der jeweiligen Systemgrenzen. So ist beispielsweise der minimale Energieeinsatz für einen Metall-Recyclingprozess in

der Regel durch die zum Einschmelzen des Metalls notwendige Energiemenge gegeben. Diese Grenze würde für einen Recyclingprozess ohne Einschmelzen verschwinden, was in der Praxis durch die Wiederverwendung von Bauteilen realisiert werden kann.

Detailfragen

An dieser Stelle müsste nun eine detaillierte Diskussion der für die Industrie 4.0 wesentlichen wissenschaftlichen Grundlagen erfolgen. Da dies im Rahmen dieses Betrages nicht realisiert werden konnte und keine entsprechenden Literaturstellen gefunden wurden, sollen zumindest einigen Beispiele Licht ins Dunkel (der Wissenschaftsgeschichte) bringen:

Nachdem Kalman die Grundlagen geschaffen hatte [27], wurden Ende der 1970er Jahre erste Regelkreise realisiert, die nicht auf einfachen (PID) Reglern, sondern auf komplexeren Modellen des jeweiligen Prozesses basierten. Damit ergaben sich die ersten direkten (online) Anwendungen für Prozessmodelle [20, 28].

So werden die materielle Produktionsprozesse immer besser vorhersagbar und damit optimierbar. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass intelligente (rechnende) Prozesse und Systeme oft kaum noch reduzierbar sind. Deren Systemverhalten ist nur experimentell zu ermitteln.

Betrachtet man die grundlegenden Eigenschaften von Netzwerken, die *network science*, so hängen diese natürlich von deren konkreter Struktur ab. Es ergibt sich eine schier unüberschaubare Vielfalt an Möglichkeiten und Grenzen. In der Praxis dominiert oft ein Netzwerk-Hype, der durch die Skalierungsunterschiede zwischen Vernetzungskosten und dem Wert des Netzwerkes hervorgerufen wird (Metcalf's Gesetz): Während die Kosten der Vernetzung näherungsweise linear mit der Anzahl der Knoten wachsen, wächst der Wert mit dem Quadrat der Knotenzahl, d.h. es gibt eine kritische Knotenzahl deren Überschreiten dem Netzwerkbesitzer zu schnell wachsenden Profiten verhilft.

Im Vergleich zu bisherigen Produktionsnetzwerken, die durch Stoff- und Kapitalströme gekennzeichnet waren, werden in Zukunft die Informationsströme dominieren. Hierbei ergeben sich Zielkonflikte zwischen Risiken und Nutzen. Insbesondere starke Verschlüsselungstechnologien werden für die weitere Akzeptanz eines öffentlichen Basisnetzwerkes zur Informationsübertragung (Internet) eine wesentliche Rolle spielen. Diese stehen sowohl symmetrisch als auch asymmetrisch zur Verfügung.

Die in Abb. 8 skizzierte hierarchische Struktur der Industrie 4.0 mag zwar das Marketing der zugehörigen Lösungen vereinfachen, kann sich jedoch auch als instabil erweisen. Ein Netzwerk billiger intelligenter Bausteine kann sich dagegen als stabil und sehr langlebig erweisen. Dies erfordert jedoch immer Maßnahmen gegen die Auswirkungen des Ausfalls einzelner Netzwerkknoten. Die ausfallsichere Realisierung eines Kommunikationsnetzwerkes ist ja bereits durch die Internet-Technologie bekannt und umgesetzt. Ganz allgemein lassen sich Netzwerke durchaus gegen die Fehlfunktion einzelner Knoten absichern (Byzantinische Fehler, [29]). Trotz der unterschiedlichen Grundbausteine lassen sich viele Eigenschaften biologischer Systeme auch auf IT-basierte Netzwerke übertragen.

Grenzen und kritische Probleme, die schöne neue Welt⁵

Bevor wir nun zum Beispiel der Prozessmodellierung kommen, sollen einige Phänomene und Probleme kurz erwähnt werden:

⁵*Brave new world* von Aldous Huxley (1932) und *1984* von George Orwell (1949) bleiben aktuell – auf der Farm der Tiere.

- Es stellt sich die grundsätzliche Frage, wieviel *Reibung* (Transaktionskosten) für den stabilen Betrieb von Informationsnetzen notwendig ist, um *Resonanzkatastrophen* zu vermeiden.
- Auch Cyber-Physische-Systeme sind anfällig gegen Hackerangriffe [30]; das Supply Chain Cyber Risk Management (SCCRM) verfolgt dann das Ziel der *supply chain cyber resilience*. Es gibt keine 100%-ige Datensicherheit und kein Naturgesetz, welches eine Annäherung an diese Grenze verbietet.
- *Daten bleiben*: Jedes Bit Information, das einmal das Internet gesehen hat, ist nicht mehr zu löschen. Das impliziert jedoch nicht eine universelle Öffentlichkeit⁶, da starke Verschlüsselungstechniken genutzt werden können.
- Die *lights out factories* werden die Regel.
- Früher wurde die IT/Automatisierung zu den realen Systemen hinzugefügt, in Zukunft kommen immer erst die virtuellen (cyber) Systeme, die dann realisiert werden.
- Die vollständige menschliche Kontrolle über die Technik bleibt Illusion.

Auch die Wissenschaft steht vor neuen Herausforderungen, und es könnten sich auch neue Naturgesetze ergeben:

Ist die selbst organisierte Kritikalität (SOC, [31, 32]) eine Eigenschaft komplexer Systeme, derart, dass optimale Zustände in komplexen Systemen immer mit diesem Skalierungsgesetz für (beliebig katastrophale) Ereignisse verbunden sind?

Für die wissenschaftliche Untersuchung der Netzwerke sind Daten (Messungen) erforderlich. Der Fluch der Dimensionalität erfordert eine Datenreduktion. Gerade im Bereich der Cyber-Physischen-Systeme sollte das Systemverhalten möglichst vor der Inbetriebnahme der physischen Komponenten untersucht werden können. Dazu dienen Prozessmodelle, die somit eine Schlüsselkomponente darstellen.

5 Beispiel Prozessmodellierung

Nach den bisherigen – allgemeineren – Ausführungen soll in diesem Abschnitt versucht werden, die zur Zeit ablaufenden Innovationsprozesse am Beispiel der Prozessmodellierung zu verdeutlichen [26]. Wie in *Abb. 12* skizziert, handelt es sich bei der Prozessmodellierung um eine Grundaufgabe der Wissenschaft, die Vorhersage des Verhaltens eines realen Prozesses durch ein Modell. Ein *Prozessmodell* stellt ein Programm dar, welches als *Prozess* auf einer IT-Plattform *läuft*. Ein *wissenschaftliches Prozessmodell* entsteht durch einen iterativen Prozess, in dem das Prozessmodell durch die wissenschaftliche Untersuchung des Prozesses, die Kunst des optimalen Entwurfs der Modellstruktur und das Handwerk der Realisierung, immer besser das reale Verhalten des Prozesses vorhersagt. Ganz wesentlich ist dabei die (in der Abbildung durch Mikroskop und Reagenzglas symbolisierte) Einbeziehung von Laboruntersuchungen und Modellen, deren Bezug zum betrachteten Prozess nicht unmittelbar einsichtig sein muss. Ohne die Einbettung in die Wissenschaft droht der auf der rechten Seite skizzierte Arbeitsablauf zu scheitern. Da jede Messung (Beobachtung) des realen Prozesses nur mit endlicher Genauigkeit möglich ist, ist eine (indirekte) Bestimmung aller Zustandsgrößen des Systems ebenso wenig möglich, wie alle Modellparameter im Parametrierungsschritt grundsätzlich sicher bestimmt

⁶Wie sie heute schon durch ungesicherte Kameras und Mikrofone hergestellt wird.

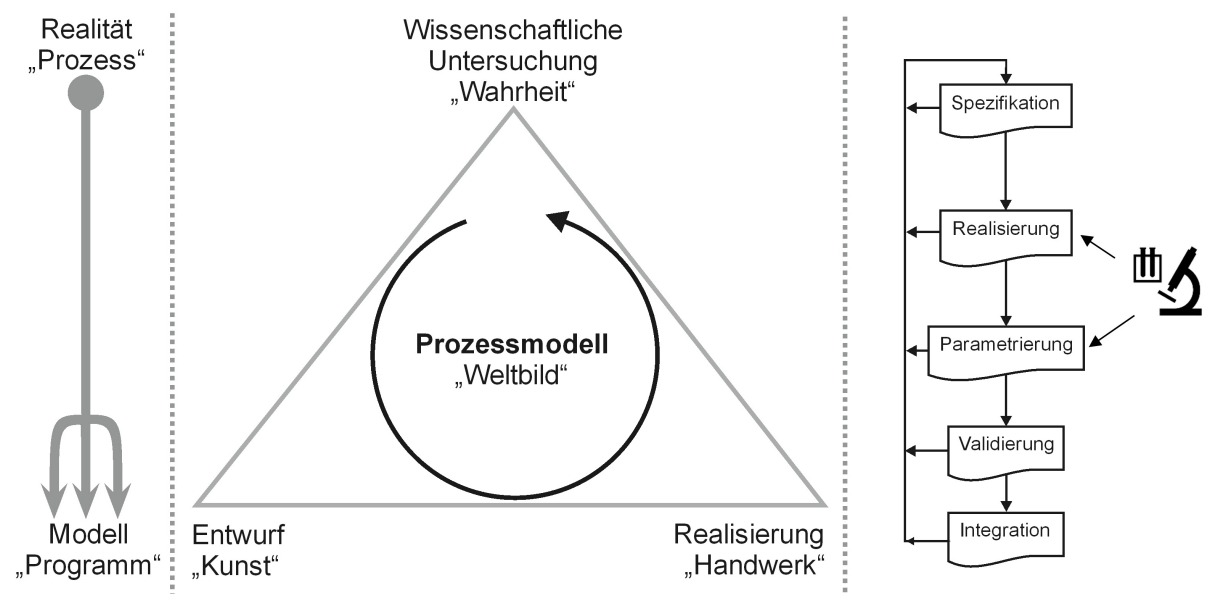


Abb. 12: Prozessmodellierung: Prinzipien und Ablauf.

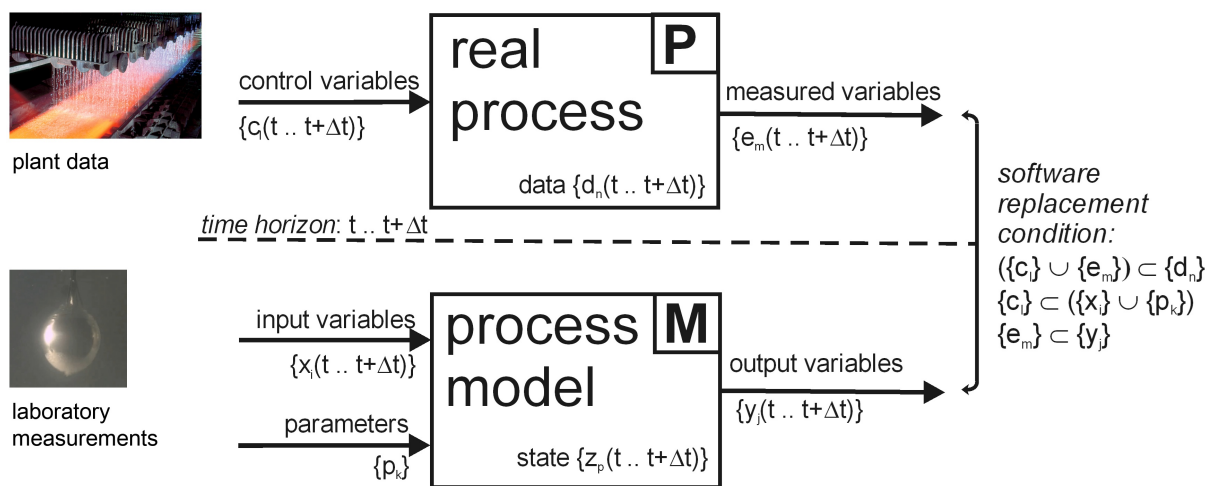


Abb. 13: Prozessmodellierung: Schnittstellen.

werden können. Die Beschränkungen des maschinellen Lernens können nur dadurch überwunden werden, das bei der Modellarchitektur auf Bausteine zurückgegriffen wird, die im Labor validiert und parametrisiert werden können. So kann sicher gestellt werden, dass die durch den Parametrierungsschritt des Prozessmodells zu ermittelnden Anpassungsparameter auch bestimmbar sind. So wie wir die Naturkonstanten in den Naturgesetzen bestimmt haben, müssen wir die Parameter der Modelle aller uns auf höheren Komplexitätsebenen interessierenden Prozesse (indirekt) messen.

Neben dem *Workflow* der Prozessmodellierung ist die in *Abb. 13* skizzierte öffentliche Schnittstellendefinition von wesentlicher Bedeutung. Die Steuergrößen c_l des realen Prozesses müssen in der Menge der Modelleingänge $x_i(t)$ und p_k enthalten sein, die am Prozess gemessenen Werte $e_m(t)$ müssen auch zu den vom Modell vorhergesagten Größen $y_j(t)$ gehören.

In vielen Ingenieurdisziplinen werden komplexe technische Systeme in Form von Netzwerken aus (einfacheren) Teilsystemen beschrieben. Existieren nun Prozessmodelle der Teilsysteme (Teilprozesse), so läßt sich das Gesamtsystem (der gesamte Prozess) durch ein Netzwerk von Prozessmodellen darstellen (siehe z.B. die *flowsheets* der Verfahrenstechnik). Oft ist eine (automatische) Abbildung auf ein Differentialgleichungssystem möglich und das Verhalten des Gesamtprozesses kann so berechnet werden. Bei der Erstellung der Prozessmodelle selbst kann wiederum eine rekursive Struktur (Modellhierarchie) hilfreich sein. Dabei können auch abstrakte Teilmodelle zum Einsatz kommen, die kein unmittelbares Pendant in der Realität besitzen.

Im Zuge der Einführung von Industrie 4.0 werden die Prozessmodelle *mission critical*. Sie sind zur Modell-prädiktiven Regelung und Optimierung der Produktion erforderlich. Hinzu kommen Modelle, die das Verhalten von Produkten beschreiben und ohne die in Zukunft die entsprechenden B2B⁷ Produkte nicht mehr eingesetzt und damit vermarktet werden können. Ein Beispiel sind Werkstoffmodelle, die nicht mehr nur intern [33], sondern auch extern verfügbar sein müssen, damit der Verarbeiter des Werkstoffs mit seinen Prozessmodellen seine Verarbeitungsschritte im Rechner simulieren und optimieren kann.

Aus der zwingenden Notwendigkeit, in den Prozessmodellen die Eigenschaften von Stoffen und Prozessen genau abzubilden, ergeben sich dann neue Aufgaben für die Wissenschaft. Viele Labormessungen müssen wiederholt und in ihrer Genauigkeit verbessert werden. Gerade im Bereich der thermodynamischen und kinetischen Daten gibt es nun eine quantifizierbare Auswirkung der Qualität von Laboruntersuchungen auf die Vorhersagbarkeit von industriellen Prozessen.

Für die an der Prozessmodellierung beteiligten Wissenschaftler ergibt sich die Aufgabe, die Systemgrenzen und die Schnittstellen nach den Prinzipien der Wissenschaft (Einfachheit und Wahrhaftigkeit) zu definieren und an der Quantifizierung von nachhaltigen Optimierungszielen mitzuwirken. Die ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen werden weiterhin mit der Realisierung von Ressourcen-optimalen Prozessen beschäftigt sein. In der Verfahrenstechnik werden Laboruntersuchungen und Simulationsrechnungen zu einem Prozessmodellbaukasten führen, der eine gleichzeitige rechnerische Optimierung durch Prozessintensivierung und optimale Gestaltung der Fließschemata (*flowsheets*) ermöglicht.

⁷Business to(2) Business.

6 Resümee

Der Übergang von der Agrar- zur Industriegesellschaft begründet ein vom Menschen dominiertes Zeitalter der Erdgeschichte (Anthropozän). Dieses basiert zunächst auf einen nicht nachhaltigem Umgang mit den natürlichen Ressourcen. Während sich in der Biosphäre bisher nur langfristig nachhaltige Teilsysteme etablieren konnten, muss die Nachhaltigkeit in der Anthroposphäre erst noch erarbeitet werden.

Durch die vernetzte digitale Informationsverarbeitung wurden in den letzten Dekaden technologische Möglichkeiten eröffnet, die dazu beitragen werden, dieses Zeitalter nachhaltig (oder kürzer) zu gestalten. Die Wissenschaft kann zur Entwicklung optimaler Prozesse und Stoffkreisläufe beitragen, die grundsätzlich notwendige Beschränkung des weltweiten Ressourceneinsatzes muss jedoch durch eine Legislative und Exekutive erfolgen, die zunächst einmal auf der gleichen Ebene wie die zu lösenden globalen Probleme etabliert werden muss. Das Ozonloch hat bewiesen: Wir können das!

Die Industrie entwickelt sich bereits global und durchläuft eine digitale Transformation, deren Auswirkungen nicht absehbar sind. Dieser globale Selbstorganisationsprozess ruft Stoff-, Energie- und Informationsströme hervor, die weit über das hinausgehen, was von auf Leithammel-basierten Organisationsstrukturen noch positiv beeinflusst werden kann – eine negative Beeinflussung (Zerstörung) ist auf Grund des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik nie wirklich schwierig. Wissenschaftlich betrachtet handelt es sich bei der Wirtschaft/Industrie um ein von einer Dimension (Geld) dominiertes System. In diesem System wird alles auf diese (finanzielle) Dimension abgebildet und so gemessen (mit einem Preis versehen). Eine Dominanz dieser einen Dimension ist somit eine konkrete Gefahr für das System (die Zivilisation), da die anderen Zielgrößen (vorgegeben von der Biosphäre und der Kultur) nicht mehr optimiert werden können. Die bekannte⁸ Geschichte der Menschheit zeigt, es geht nicht immer aufwärts mit der Zivilisation. Die nächste Bifurkation ist bereits im Gange!?

Unter dem Stichwort Industrie 4.0 sollten daher nicht nur absehbare Innovationen betrachtet werden, als da sind:

- Industrie 4.0 ist im wesentlichen Organisation, der Übergang von der hierarchisch geplanten Organisation zur Selbstorganisation auf der Basis von Computernetzwerken.
- Industrie 4.0 beinhaltet die digitale Vernetzung der Wertschöpfung. Sie wird (noch) von Menschen gestaltet, setzt jedoch ungebildete Mitarbeiter nur noch ein, wenn diese extrem kostengünstig sind.
- Durch den iterativen Entwurf von Produkten und Prozessen im virtuellen Raum wird zunehmend erst das Cyber-, dann das Physische System realisiert.
- Aus der Sicht der Industrie wird die Rationalisierungslogik der letzten Jahrzehnte weiter fortgesetzt.

Bei aller Verwirrung über die Inhalte der digitalen Transformation bleibt noch auf eine fortschreitende Eigenschaftsänderung im Bereich der technischen Systeme hinzuweisen: Der Mensch ist nicht mehr das einzige „intelligente“, kommunizierende, entscheidende und handelnde Teilsystem. So wie am Anfang der industriellen Revolution jede Teilaufgabe vom komplexen adaptiven System Mitarbeiter versehen wurde, so werden in Zukunft komplexe Cyber-Physische-Systeme und Mitarbeiter zusammenarbeiten. Der Kreis schließt sich mit neuen

⁸Ein Effekt der Digitalisierung ist übrigens die Möglichkeit, historische Fakten nun erstmals verlustfrei zu archivieren.

Kollegen. Diese Kollegen werden neue Eigenschaften haben. Sie teilen Erlerntes, fast ohne Aufwand, und wir kennen ihre Möglichkeiten noch nicht. Das hat schon zu einer neuen Art von Führungskräften geführt, die mehr moderieren als leiten (Ministerin Andrea Nahles am 4.10.2016 auf ARTE in der Sendung „Schichtwechsel“: „Ich hab ... keinen Plan, ich weiss nicht genau wie es weitergeht, ...“). Das impliziert die philosophische Frage: Schaffen wir etwas, was uns überlebt? Das ist kein Übergang von heute auf morgen, es passiert tagtäglich und fast unbemerkt – seit Jahrzehnten. Wissenschaftler sahen sich im 2. Weltkrieg gezwungen, aus Ideen Technologien zu erschaffen. Hier wurde nicht notwendigerweise die Büchse der Pandora geöffnet, es kommt darauf an, was wir daraus machen!

Anmerkung des Autors:

In der Wissenschaft sollten Publikationen einem Begutachtungsprozess unterworfen werden. Bei diesem Beitrag ist es dem Leser überlassen, die Wertungen und Gewichtungen zu beurteilen. Was ist *Bla-Bla* und wo verhindert das Zadeh'sche Inkompatibilitätsprinzip [34] die Konkretisierung? Ich hoffe einige Denkanstöße gegeben zu haben und habe die Gelegenheit genutzt, einige großartige, einige fragwürdige und einige unwichtige Arbeiten zu zitieren. Und was Denkanstöße betrifft, so stehen wir – nicht nur im Bereich der Wissenschaft (z.B. [35]) – auf den Schultern von Giganten (z.B. [36, 37]). Die verlinkten Wikipedia Artikel erschienen im Sommer 2016 lesenswert.

Literatur

- [1] W Weaver. *The scientists speak*. Boni & Gaer, NY, 1947.
- [2] A Toffler. *Die Zukunftschance (the third wave)*. Bertelsmann, 1980.
- [3] A W Scheer, A Fröhling, and N Schneider-Brennecke. *Die etransformation beginnt! : Lessons Learned - Branchenperspektiven Hybrid Economy - M-Business*. Physica-Verlag, Heidelberg, 2002. doi:10. 1007/978-3-642-57550-1.
- [4] Zukunftsbild „Industrie 4.0“. BmBF, www.bmbf.de, Okt. 2013.
- [5] R Obermaier, editor. *Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe: Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen*. Springer Gabler, 2016. doi:10. 1007/978-3-658-08165-2.
- [6] G Taguchi. An introductory text for design engineers: design of experiments. Japanese Standards Association, 1981.
- [7] J P C Kleijnen. *Design and analysis of simulation experiments*, volume 111 of *International Series in Operations Research & Management Science*. Springer, Dordrecht, 2008. doi:10. 1007/978-0-387-71813-2.
- [8] I Lakatos. Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes. In S G Harding, editor, *Can Theories be Refuted?*, volume 81 of *Synthese Library*, pages 205–259. Springer, 1976. doi:10. 1007/978-94-010-1863-0.
- [9] P W Anderson. More is different: broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. *Science*, 177(4047):393–396, Aug. 1972.
- [10] J E Hirsch. An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(46):16569–16572, Nov. 2005. doi:10.10 73/pnas.0507655102.

- [11] L Boltzmann. *Wissenschaftliche Abhandlungen*, volume I bis III. Barth, Leipzig, 1909.
- [12] J W Gibbs. *Elementare Grundlagen der statistischen Mechanik*. Barth, Leipzig, 1905.
- [13] H A Krebs and W A Johnson. The role of citric acid in intermediate metabolism in animal tissues. *Enzymologia*, 4:148–156, 1937. doi: 10.1016/0014-5793(80)80564-3.
- [14] S Wolfram. *Mathematica: A System for Doing Mathematics by Computer*. Addison Wesley, 1 edition, 1988.
- [15] S Wolfram. *A new kind of science*. Wolfram Media, Champaign, Ill., 2002.
- [16] R P Feynman. What is science. *The Physics Teacher*, 7(6):313–320, 1969.
- [17] R Harre. *The principles of scientific thinking*. Macmillan, London, 1970. doi:10. 1007/978-1-349-81592-0.
- [18] N R Hanson. *Patterns of discovery: an inquiry into the conceptual foundations of science*. Cambridge Univ. Press, 1975.
- [19] R P Feynman. Cargo Cult Science. *Engineering and Science*, 37(7):10–13, June 1974.
- [20] J A Richalet, A Rault, J L Testud, and J Papon. Model predictive heuristic control: applications to an industrial process. *Automatica*, 14(5):413–428, Sept. 1978. doi: 10.1016/0005-1098(78)90001-8.
- [21] J Lee, B Bagheri, and H A Kao. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3:18–23, 2015. doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- [22] R Bellman. *Dynamic programming*. Univ. Press, princeton, 1957.
- [23] G F Hughes. On the mean accuracy of statistical pattern recognizers. *IEEE Transactions on Information Theory*, 14(1):55–63, Jan. 1968. doi:10.1 109/TIT.1968.1054102.
- [24] G E Moore. Progress in digital integrated electronics. *Technical Digest 1975.IEEE International Electron Devices Meeting*, 21:11–13, Dec. 1975.
- [25] J P Birat. Environmental Metallurgy: Continuity or New Discipline? *steel research international*, 85(8):1240–1256, Aug. 2014. doi:10.100 2/srin.201300279.
- [26] J Wendelstorf. *Prozessmodellierung in der Hochtemperaturverfahrenstechnik*. Papierflieger Verlag, zugleich Habilitationsschrift, TU-Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 1 2016. doi:10.2 1268/20160212-111545.
- [27] R E Kalman. *Topics in mathematical system theory*. McGraw-Hill, NY, 1969.
- [28] C E Garcia, D M Prett, and M Morari. Model predictive control: Theory and practice – A survey. *Automatica*, 25(3):335–348, May 1989. doi: 10.1016/0005-1098(89)90002-2.
- [29] L Lamport, R Shostak, and M Pease. The Byzantine generals problem. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 4(3):382–401, July 1982. doi:10.1145 /357172.357176.
- [30] M Christopher and H Peck. Building the Resilient Supply Chain. *International Journal of Logistics Management*, 15(2):1–14, 2004. doi:10. 1108/09574090410700275.

- [31] P Bak, C Tang, and K Wiesenfeld. Self-organized criticality: An explanation of the $1/f$ noise. *Physical Review Letters*, 59(4):381–384, 1987.
- [32] P Bak. *How nature works*. Springer Verlag, New York, 1996.
- [33] F G Rammerstorfer, C Jaquemar, D F Fisher, and H Wiesinger. Temperature fields, solidification progress and stress development in the strand during a continuous casting process of steel. In *Int. Conf. Numerical Methods in Thermal Problems*, pages 712–722. Pineridge Press, 1979.
- [34] L A Zadeh. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3(1):28–44, Jan. 1973. doi:10. 1109/TSMC.1973.5408575.
- [35] N Wiener. *The human use of human beings*. Houghton Mifflin, Boston, 1950.
- [36] T More. *Utopia*. (deutsch: Thomas Morus, Utopia, Berlin, 1922), 1516.
- [37] J E Lovelock. *Gaia: a new look at life on Earth*. Univ. Press, Oxford, 1979.